

ほえる鳴き砂

古来より悪魔の声や太鼓の音にたとえられてきたブーミングサンド
愛らしい音を奏でる日本の鳴き砂とは違った、とどろく砂の謎に迫る

F. ノリ／P. ショルツ／M. ブレッツ (ミシガン大学)

何千年もの間、砂漠を旅する人々は、お化けか悪魔が発すると思われる不思議な音を聞いた。マルコ・ポーロは、「悪霊がときにありとあらゆる種類の楽器の音で大気を満たし、太鼓の音や武器がぶつかり合う音まで聞こえてきた」と報告している。だが今日では、オカルト的ではない科学的説明が可能だ。このさまざまな音は、砂が動くときに生ずる音で、このような音を発する砂を「ブーミングサンド（とどろく砂, booming sand）」と呼ぶ。

これまでに少なくとも30カ所のブーミング砂丘が、アフリカやアジア、北アメリカなどで発見されている。その音を聞いた人々は、いろいろなものにたとえている。鐘、トランペット、パイオルガン、霧笛、大砲、雷、低空を飛ぶ飛行機、電線の唸（うな）る音、うめき声や唸り声。ところが、世界のさまざまな場所のブーミングサンドが、どのような条件下で、どのようにして音を発するのかについては、研究者の説明は一致していない。

砂の粒子のサイズや形が条件なのか？ それらが相互作用する方法は？ いずれも現在研究が進められているが、系統立った検討はほとんどなされていない。完全に発音機構を説明するシナリオは1つもないのだ。最終解答はまだないので、ここでは満足のいく説明につながるような疑問を提示しよう。

音を出す砂の種類

砂によって生ずる音はつねにドラマチックというわけではない。たとえばある砂浜の上を歩くと足の下できしるような音（スキッキング音）がする。このタイプの砂は「スキッキングサンド（きしる砂, squeaking sand）」あるいは「ホイスリングサンド（ささやく砂, whistling sand）」と呼ばれ、世界中の浜辺や湖の岸や川床にある（訳注：日本の鳴き砂はこのタイプ）。

これらに対して、ブーミングサンドは、あまり共通点のない従兄弟のようなものだ。マルコ・ポーロを驚かせたばかりか、チャールズ・ダーウィンを不思議がらせ、無数の人々を欺いた。ブーミングサンドはたいてい大規模で、辺鄙（へんぴ）な砂丘か、水から離れた浜辺にある。

聞いた人はブーミングサンドの音を楽器にたとえることが多い。ときには一定の間隔で連続的な音を出す打楽器、また別の砂丘ではトランペットや弦楽器やチューブベル（鐘に似た音を出す打楽器）に似た音が聞こえる。

このようなはっきりした反響は、通常、少量の砂がある種の力によって動くときに生じ、1つの周波数を生ずる。私たちは、1994年にネバダ砂漠のサンドマウンテンで起こったブーミング音を聞いたが、これはオーストラリアの先住民アボリジニが奏でるディジェリ

ドゥーという木管楽器の低い単調なリズムに似ていた。

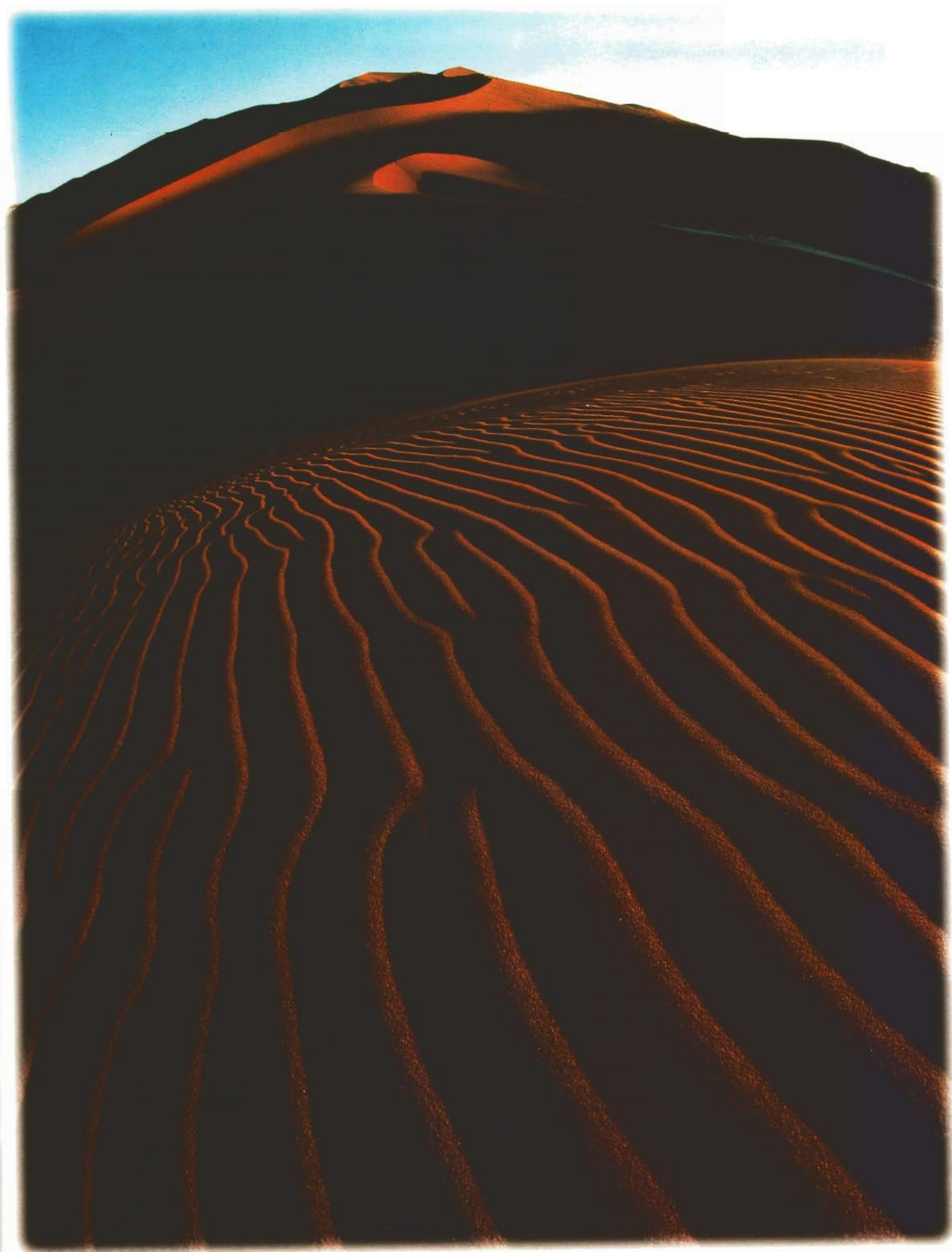
砂漠の表層なだれが音の原因

スキッキングサンドは非常に高い周波数500～2500Hz（ヘルツ）の1/4秒以下で終わる音を生ずる。その響きは澄んでいて、4つか5つの倍音を含んでいることが多い。一方、ブーミングサンドの音は大きく、50～300Hzの低周波音で、大きい砂丘では15分ほど続く（普通は数秒で終わるが）。それに加えて、近接周波数を伴うのでやや騒々しい。ブーミングの音は、倍音を2つ以上含むことはない。

このような大きな違いがあるため、2つの砂は同じく音を出すものの、発音のメカニズムはまったく違ふとされてきた。しかし1970年後半に、当時カリフォルニア工科大学にいたハフ（Peter K. Haff）は、ブーミングサンドを使ってスキッキング音を出すことに成功し、2つの砂に密接な関連があることを示した。

どちらの場合も、音を出すためには砂が動かなければならない。スキッキング

ブーミング砂漠 写真はアフリカ南部にあるナミビアのナミブ砂漠。風によってできた砂の山の表層でなだれ現象が起こると、砂は低いうなり声（ブーミング音）をあげる。この音は数km先まで聞こえる。





サンドマウンテン (米ネバダ州)

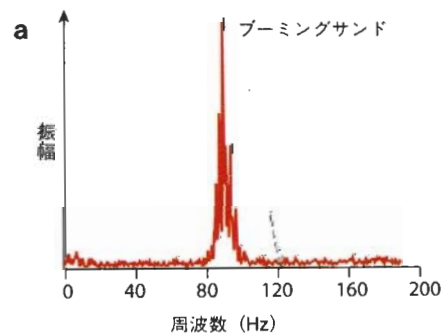
COURTESY OF MICHAEL BRETZ



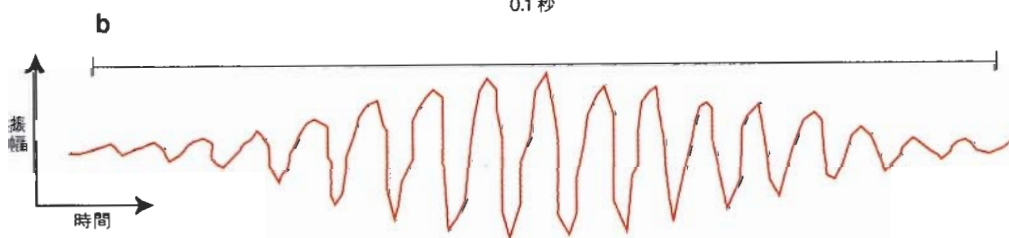
ケルソ砂漠 (米カリフォルニア州)

TERRENCE MOORE

世界のブーミングサンド ブーミングサンド (赤丸印) は世界中にある。ブーミングサンドが発生する音は、グラフ (a) にほぼ近い周波数を示し、比較的継続時間が長く、



0.1 秒



ブーミングサンドでは、砂の上を歩いたとき、砂が下に押されて動き、キュッという音が出る。ブーミングサンドの場合は、砂の表層で起こるなだれのような現象「アバランチ」によって、砂の移動が起こる。音はこのなだれ現象の中で発生するため、音の発生のなぞも、この現象に隠されているに違いない。

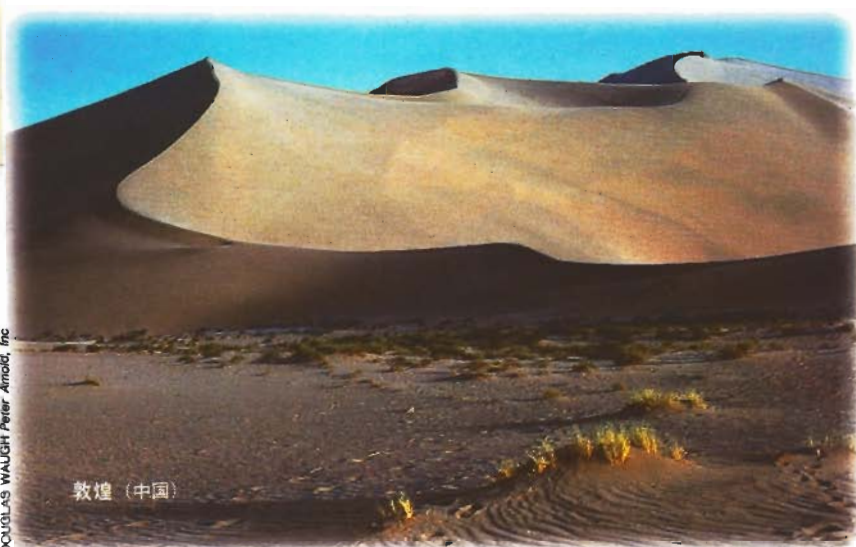
砂の表層でなだれ現象が起こるには、まず風が砂丘の砂をある角度まで積み上げねばならない。その角度は、乾燥した砂漠の砂の場合、約35度である。ひとたびこの角度が形成されるや、砂

丘の風下側が崩れはじめる。上の砂層は下の砂層の上をすべり、あたかもトランプを切るような状態になる。同時に上の層の個々の粒子は下の層の粒子の上を転げ落ち、瞬間的に粒子の間の空間に落ち込み、また跳ね上げながら下方に向かって旅を続ける。

砂粒の一致協力した上下運動がブー

ミング音の秘密なのだろう。十分発達したなだれ現象では、すべり落ちる砂の板のエネルギーのほとんどが貯め込まれているので、音の出力も最大になる。大量の砂がある場所では、10km離れていてもブーミング音を聞くことができる。

この振動にはミステリーがたくさん



DOUGLAS WALUGH Peter Arnold, Inc

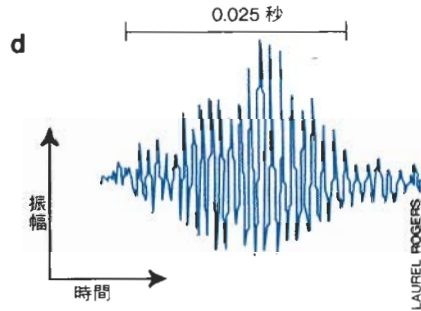
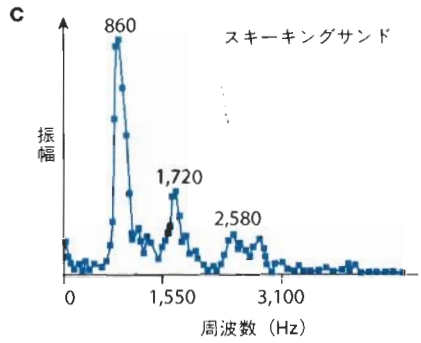
敦煌 (中国)

うなりを発する (b)。他方、スキージングサンの音は、基本周波数の倍音を含む (c) が、継続時間が非常に短い (d)。



JIM BRANDENBURG Minden Pictures

ナミブ砂漠 (ナミビア)



LAUREL ROGERS

ある。第1に、ブーミング音がどんな周波数の音が重なってできているかがよくわかっていない。1970年代にヒューストン大学のクリスウェル (David R. Criswell) らは、各周波数はそれぞれの上下運動の時間にかかわるもので、周波数どうしは無関係であることを発見した。全体として見れば、複数の周

波数で十分に広い範囲をカバーでき、その幅は種々の因子によって決定される。

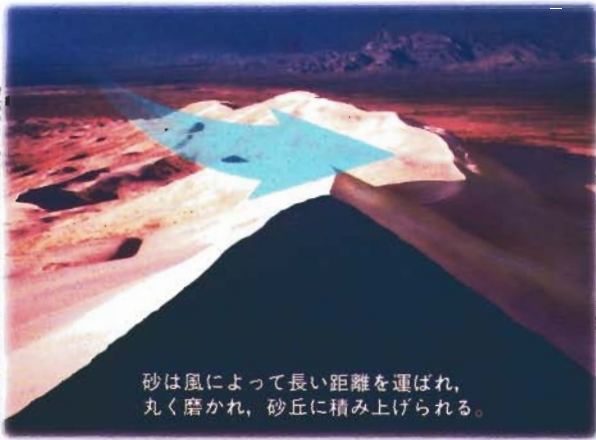
たとえばネバダ州のサンドマウンテンではほぼ50~80Hz、リビアのコリゾーの砂は50~100Hz、南アフリカのカラハリ砂漠では130~300Hzである。これらの音は、ずり落ちる砂の板 (せん断板という) の中のさまざまなタイプの振動により生じるもので、ときには非楽音的で不快な音を出す。

このような音は、すべり落ちる大量の砂によって生ずるので、うなり音もまた大きい。実際、ブーミングサンド

の音は耳を震(ろう)するものであり、それによって起こる振動は非常に強く、その中には立ってられないくらいだ。

砂の振動特性を知る手がかりは、粒子そのものにある。音を発するかどうかにかかわらず、大部分の砂の平均径は約300 μ mといったところだ。ブーミング砂丘の砂の粒子は大きさが非常に均一である。とくに、ブーミングが始まることの多い風下の砂丘頂上近くでは、粒子径がそろっているため、より効果的なずれが生ずる。逆に粒子が細かすぎると大きい粒子の運動を妨げる。

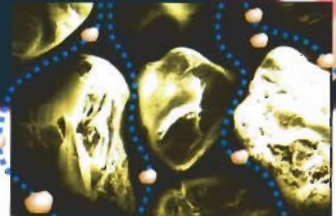
しかし、均一サイズであることはブ



砂は風によって長い距離を運ばれ、丸く磨かれ、砂丘に積み上げられる。



砂の動きを妨げるようなダストや小粒子を、雨が洗い流す。



ブーミングの条件 砂がブーミング音を発するためには、多くの条件が整わなくてはならない。ごみやダストがなく、乾燥していて、磨かれてさらに丸められた砂粒が、砂丘の頂上近くにある時に発生する。砂の傾斜が34度より険しくなると、砂丘はアバランチと呼ばれるなだれのような現象を起こす。砂の上層は下層よりも速く動き(a)、粒子が繰り返し上下する(b~d)。このような一斉に起こる上下運動がブーミングを生ずると思われる。

ブーミングの条件ではない。リビアのコリゾーやゲルフ・ケビブのブーミングサンドは粒子径の範囲が広い。さらに付け加えるなら、近くの鳴かない砂丘にもよく似た粒子である。

ブーミングサンドの粒子の凹凸はわずかに数ミクロンオーダーで、特別に滑らかな表面をもつ傾向がある。ブーミング砂丘は大きい砂源の風下の端で発見されることが多い。砂粒子は砂漠の長い距離を跳びはね、転がって、よく磨かれている。砂粒は、長い時間をかけて、砂丘の中での移動の繰り返しによって磨かれるのである。スキーキングサンドも同様に、滑らかな面をもつ傾向がある。

ネバダ州のサンドマウンテンとアフリカ南部のカラハリ砂漠のブーミングサンドを詳しく調べると、すべての粒子がさほど丸くはないことがわかる。1936年に南アフリカのルイス(A. D. Lewis)が、普通の食卓塩の粒子でブーミングさせたことを報告した。逆に球状のガラスビーズではブーミングさせることができない。これらの発見は、滑らかさと丸さは音の発生に不可欠であり、加えて特定の範囲の粗さも必要であることを示している。

もうひとつの重要なファクターは湿度である。なぜなら水分は粒子間の摩擦を変えたり、粒子が互にくっついて、ずり落ちるのを妨げる。音の発生は乾燥が最も速いこの部分で起こる。降雨は砂漠ではまれであるが、砂丘は著しい効率で水を保持する。表面に近い砂は速やかに乾燥するが、砂丘の峰の付近は最も速く乾燥する。

風下側の峰近くは、粒子表面が滑らかで大きさがよくそろい、しかも湿気が少ないので、音を発生しやすい。風は風下面の頂上近くに砂を運びやすいため、下部よりも頂上付近に砂が蓄積され、なだれ現象が起こる場所の堆積角度を少しずつ増大させる。

一般的には、大きい板状の砂が峰の近くで割れる。ブーミングサンドの場合、この砂の板はゆるいスロープにさしかかっても流れが減速されることはない。上の部分が崩れると、代わりに下の方にめりこんで、下の部分を持ち上げる。板の割れが乱流を作り出すのである。

鳴き砂の研究を進めるのはなかなか容易ではない。砂が音を発するという現象の奇妙さが研究を阻んでいる。実験室で音を再生しようとする、これ

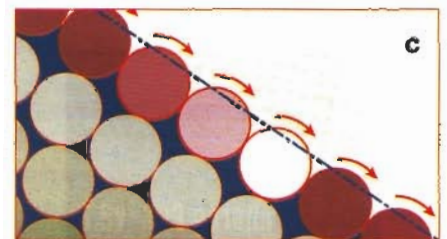
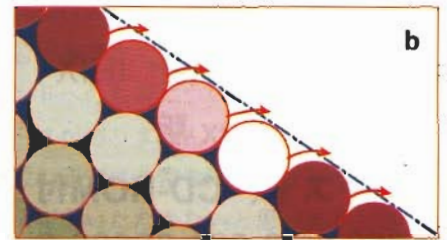
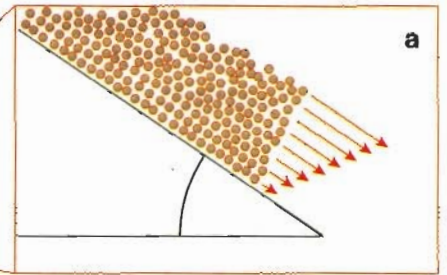
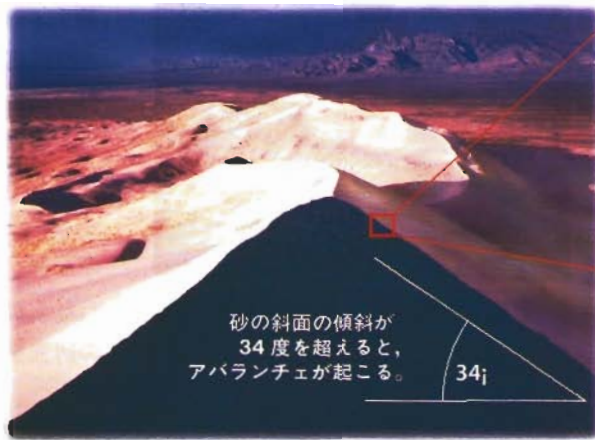
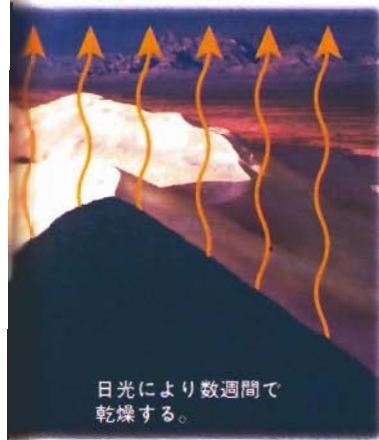
がまた難しい。文献はどうかといえば、長い年月、ブーミングサンドとスキーキングサンドの区別が明確でなかったため、古い文献は信頼性が低い。

研究100年史

1889年に米国の地質学者ボルトン(H. Carrington Bolton)は、砂が鳴くという現象についての最初の研究を発表した。彼は、水がゆっくりと蒸発することによって砂の粒子の上に可溶性不純物の薄い膜ができ、これが音を発すると考えた。ずれ面の間の弾力のあるクッションが音を発生し、その音の大きさとピッチは粒子自身の表面構造により変化する。ボルトンは、おもにスキーキングサンドを考察し、同じモデルをブーミングサンドの説明にも利用している。

ほぼ同じころ、英国の科学者カルス=ウィルソン(Cecil Carus-Wilson)は、スキーキングサンドが発する音は、個々の粒子の相互摩擦の結果であるとされた。彼は音を発する砂は球状で、よく丸められ、粒ぞろいであると書いている。クリスウェルらは、後にこれらの結果を定量化した。

それから80年近くを経た1966年、英



LAURIE GRACE

国のエンジニアでフィールド調査を指揮していたバグノルド (R. A. Bagnold) は *Proceeding of the Royal Society* 誌に、「乾燥した砂のずれとゆるみ、および歌うメカニズム (The Shearing and Dilatation of Dry Sand and the 'Singing Mechanism')」という論文を発表した。

彼は、鳴き砂という現象に関する初の総括的な議論を試み、スキーキングサンドもブーミングサンドも音を発生する過程は同じであると述べた。彼の議論は、ゆるみ、すなわち「粒子間の空間」の概念に基礎を置いている。1つの砂の板が別の板の上を滑るとき、上の粒子が下の粒子の間の空間に落ちるために、砂の粒子は規則的に上下する。この集合振動によって発生する音の周波数は、粒子の平均径の平方根に比例する。

このメカニズムはエレガントではあるが、ブーミング現象を完全には説明していない。たとえば、4~5種類のタイプの振動が、どうやって同時にただ1つの板から生ずるかを考えていない。また、砂が流れている間中ずっと続いている低周波のうなりについても説明していない。

このバグノルドの説は、むしろスキーキングサンドの説明に役立つ。スキーキングサンドを踏むと、ブーミングサンドで起こるなだれ現象と同じく、面に沿ったずれが発生すると彼は言っている。ただ1つの差は、そこに加わる力であると彼は主張する。砂の重量だけなら、なだれ現象を生じてブーミング音を発するが、足で踏みつけた圧縮応力は、ずれを生じさせるだけでなだれは起こらず、その結果スキーキング音が発生する。事実、スキーキングサンドが発する周波数は、ブーミングサンドよりもバグノルドのモデルに合う。

ミステリーの検証

ブーミングサンドでスキーキング音を発生させることはできないが、1889年までさかのぼると、同じタイプの砂が双方の音を生じうるという指摘があった。ボルトンは次のように書いている。

ハワイにある砂は浜辺と砂漠の発音特性をもち、エジプトのブーミング砂丘ジェベル・ナゴスと同じく、アバランチによって同じ音を発する。砂を袋に入れて2つをぶつけると、フクロ

ウのようなホーホーという特異な音を出す。英国スコットランドのエッグ島やマサチューセッツ州マンチェスターなどでも同じ音を聞くことができる。

1970年に、ハフもまたカリフォルニア南東部のケルソー砂丘のブーミングサンドを使って高周波数のスキーキング音を出すことに成功した。この発見はバグノルドの説の裏付けにもなった。ブーミングサンドとスキーキングサンドの違いは、音の発生メカニズムが圧縮かなだれ現象か、という点にある。

しかし、実験室で強制的に鳴かせることができるブーミングサンドと、自然のままではしか鳴かない砂には違いがある。ハフの解析によれば、ブーミン

Addison Wesley

科学者のための
グラフィックス処理ソフト

Khoros Pro™ v2.2

Solaris® Digital® IRIX®

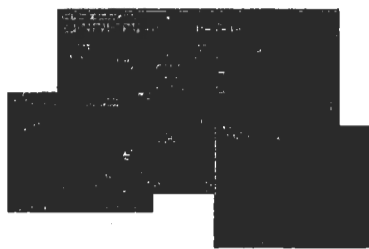
Linux 版

テキスト、CD-ROM付

\$69.95 0-201-32686-8



多彩な機能搭載の
アカデミックパッケージ

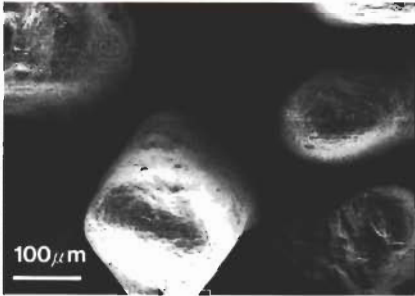
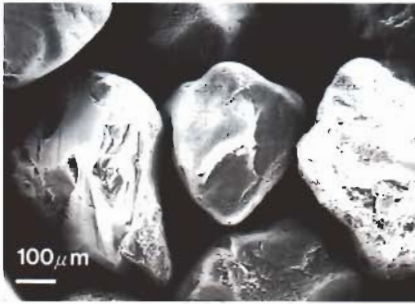
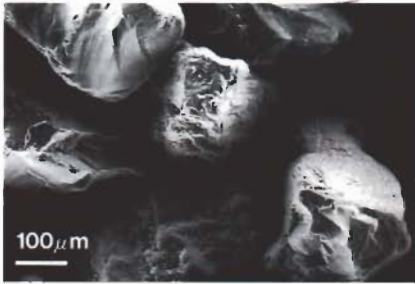


◆ この書籍は

アカデミックパッケージ
(学生版)です。ご購入時に
学生証が必要です。

アジソン・ウェスレイ・
パブリッシャーズ・ジャパン
〒101 東京都千代田区猿樂町1-2-2
日貿ビル
Tel 03 3291 4581 Fax 0332914592

<資料請求番号106>



COURTESY OF FRANCO NORI, PAUL SHOLTZ AND MICHAEL BRETZ

電子顕微鏡で見た砂の形 ごく普通の砂の表面は凹凸が多い(上、ミシガン州ヒューロン湖岸の砂)。これに比べると、スキージング音を出す砂の表面はなめらかだ(中、ミシガン湖岸の砂)。さらにブーミング音を出す砂になると、磨かれたようにつるつるしている(下、ネバダ州サンドマウンテンの砂)。

グサンドから出るスキージング音には多重周波数が存在し、まったくのスキージングサンドから出る音とは違う。

砂がブーミング音を発するためにはいくつかの条件がある。第1は、その砂丘がその砂の生成源から離れていなければならない。そのことによって風が砂粒を長い距離運搬し、粒ぞろいにし、砂丘の頂上またはその近くで十分丸められる。汚れのない雨はダストや小粒子を粒子間から洗い出す。そのあと1~2週間かけて乾燥し、最後に風が頂上へと砂を押しあげ、なだれ現象が起こる。

砂が鳴く能力を支配する最も重要な

パラメーターは、ずれに対する抵抗(せん断抵抗)である。砂があまり固く充填されると、ずれ落ちることができない。逆に充填がゆるすぎると、流体の性質を示すようになり、うまくずれ落ちなくなる。これらすべてのファクターが砂が鳴くことに影響していると思われるが、それらがどう絡むかは将来の研究を要する。

鳴き砂の最大の魅力は…

ハワイは研究の開始によい場所だと思う。カウアイ島とニーハウ島は、砂漠ではないブーミングサンドのただ1つの例である。これらの場所の砂は砂漠の砂より湿っていて、粒子は大きく約460µmである。さらにその砂は他の場所の砂と違っている。砂丘の砂は主として炭酸カルシウム粒子で、貝から生成したものであり、石英からではない唯一のブーミングサンドである。例外があるからこそ法則に光が当たるといふもので、この海浜の研究はきつと価値があるに違いない。

ブーミングもスキージングも、バケツや袋で再生可能である。どうして音が出るのかを正確に理解するには、ずれの過程の内部深くをのぞくことが必要だ。複雑な放射線装置で見ることでも可能であろうが、そのような解析はまだ行われていない。

魅力的な研究方法の1つは、砂の電氣的挙動を探ることである。1粒の石英粒子を圧縮すると両端に反対の電荷が発生する。この電荷を分離すると粒子が互いに引き合う。

1936年にルイスは、カラハリ砂漠のブーミングサンドをゆっくり容器から流し出すと、粒子はしばしば数珠状に連なり1cmほどの長さになることを観察した。検電器で調べたところ、この糸状の粒子の連なりは明らかに帯電していた。しかし、私たちは、電氣的にアースして電流を逃がしても発音特

性には影響がないことを発見した。電気の影響は、なぜ湿気がブーミングを妨げるかを説明するには役立つが、強力な証拠はまだない。

そのほかの期待できる研究方法としては、ずれ応力の重要性を知るために、砂粒の鉱物組成を系統的に調べること

である。いくつものパラメーターを操作する研究のためにも、またパラメーターの役割を調べるためにも、合成ブーミングサンドを作り出すことが有用である。しかし、何と云っても鳴き砂の最大の魅力は、解けない謎が残っていることである。 ■

著者 Franco Nori, Paul Sholtz and Michael Bretz

3人はアナーバーにあるミシガン大学で、鳴き砂の共同研究を行っている。ノリは1987年にイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校より Ph. D. を取得し、現在は物理学の準教授。物性物理学に関するさまざまな問題に取り組んでいる。ショルツは、ミシガン大学で物理学と数学の B. S. (理学士) を取得。現在はソフトウェア開発にたずさわっている。ブレッツは物理学の教授で、1971年にワシントン大学(シアトル)より Ph. D. を取得した。多様な系における臨界現象を研究している。

原題名

Booming Sand (SCIENTIFIC AMERICAN September 1997)

関連図書・文献

THE PHYSICS OF BLOWN SAND AND DESERT DUNES. R. A. Bagnold. Methuen, London, 1954.

SOUND PRODUCING DUNE AND BEACH SAND. J. F. Lindsay, D. R. Criswell, T. L. Criswell and R. S. Criswell in Geological Society of America Bulletin, Vol. 87, pages 463-473; 1976.

SOUND-PRODUCING SAND AVALANCHES. Paul Sholtz, Michael Bretz and Franco Nori. Available at http://www-personal.engin.umich.edu/~nori/booming_sand.html on the World Wide Web.

『消えゆく白砂の唄-鳴き砂幻想』三輪茂雄、近代文芸社